

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
18. August 2005 (18.08.2005)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2005/075945 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **G01F 1/712**,  
G01P 5/22, 3/80

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **ZANGL, Hubert**  
[AT/AT]; Schröhlstrasse 15, A-8662 Mitterdorf (AT).  
**FUCHS, Anton** [AT/AT]; Keplerstrasse 85, A-8020 Graz  
(AT).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/AT2005/000044

(22) Internationales Anmeldedatum:  
10. Februar 2005 (10.02.2005)

(74) Anwalt: **MATSCHNIG, Franz**; Siebensterngasse 54,  
A-1071 Wien (AT).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,  
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,  
CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES,  
FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,  
KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD,  
MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG,  
PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM,  
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM,  
ZW.

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

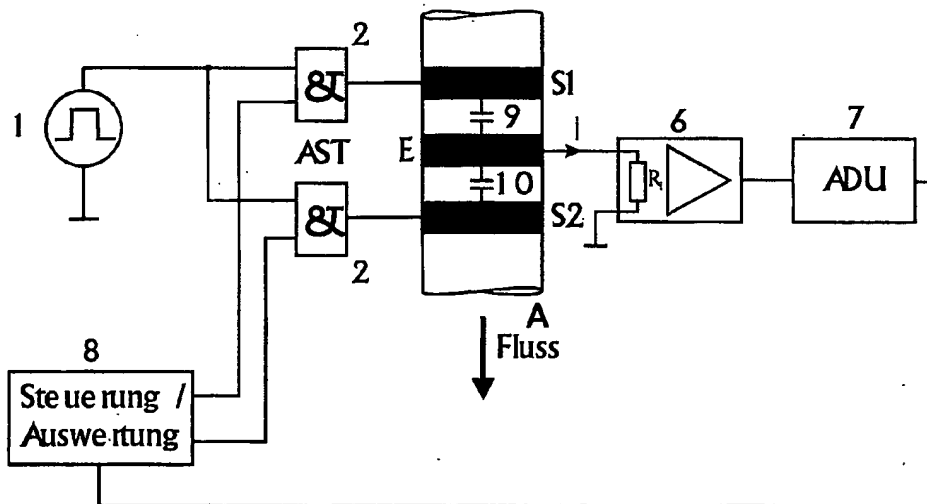
(30) Angaben zur Priorität:  
A 189/2004 10. Februar 2004 (10.02.2004) AT

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von  
US): **TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ** [AT/AT];  
Rechbauerstrasse 12, A-8010 Graz (AT).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF A FLOW

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM BESTIMMEN VON PARAMETERN EINER STRÖMUNG



A... FLUX

8... COMMANDE/EVALUATION

(57) Abstract: The invention relates to a method and a device for determining the parameters of a fluctuating flow of a fluid in a pipe, wherein at least three electrodes (S1, E, S2) that are placed at a distance from one another in the direction of flow are provided in the periphery of the flow, wherein alternating voltage signals ( $s_s$ ) are fed to a first upstream transmission electrode arrangement (S1) and to a second downstream transmission electrode arrangement (S2) and the receiving signals ( $s_e$ ) generated by the displacement current are detected in a receiving electrode arrangement (E) located between the transmission electrodes and subjected to a time-discrete cross-correlation. The throughput times of the fluctuations detected by the electrodes are determined on the basis of the results.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

**Erklärung gemäß Regel 4.17:**

— hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii) für alle Bestimmungsstaaten

(57) **Zusammenfassung:** Ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Bestimmen von Parametern einer Fluktuationen aufweisenden Strömung eines Fluidums in einer Leitung, wobei am Umfang der Strömung zumindest drei, in Strömungsrichtung voneinander in Abstand befindliche Elektroden (S1, E, S2) vorgesehen sind und wobei einer ersten, stromauf gelegenen Sendelektrodenanordnung (S1) sowie einer zweiten, stromab gelegenen Sendelektrodenanordnung (S2) Wechsellspannungssignale ( $s_s$ ) zugeführt werden und durch Verschiebestrome an einer zwischen den Sendelektroden gelegenen Empfangselektrodenanordnung (E) entstehende Empfangssignale ( $s_e$ ) erfasst und einer zeitdiskreten Kreuzkorrelation unterworfen werden, und aus den Ergebnissen die Durchlaufzeiten der von den Elektroden erfassten Fluktuationen ermittelt werden.

## VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM BESTIMMEN VON PARAMETERN EINER STRÖMUNG

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Bestimmen von Parametern einer Fluktuation aufweisenden Strömung eines Fluidums in einer Leitung, wobei am Umfang der Strömung zumindest drei, in Strömungsrichtung voneinander in Abstand befindliche Elektroden vorgesehen sind.

Ebenso bezieht sich die Erfindung auf eine Vorrichtung zum Bestimmen von Parametern einer Fluktuation aufweisenden Strömung eines Fluidums in einer Leitung, wobei am Umfang der Strömung zumindest drei, in Strömungsrichtung voneinander in Abstand befindliche Elektroden vorgesehen sind.

Für kapazitive Füllstandsmessung in Behältern gibt es eine Vielzahl von Verfahren und entsprechenden Vorrichtungen. Berührungslos arbeitende kapazitive Sensoren zur Erkennung des Füllstandes eines dielektrischen Mediums im Inneren von Behältern mit nicht-metallischen Wänden sind bekannt und finden sich beispielsweise in der chemischen oder pharmazeutischen Industrie. Einen solchen Sensor beschreibt beispielsweise die DE 19949985 C2. Ein Aufbau, bestehend aus mehreren matrixförmig angeordneten Sensorfeldern, ist der DE 10008093 A1 zu entnehmen. Eine Vielzahl von kapazitiven Sensoren nutzen abgesetzte Sonden zum Ermitteln des Füllstandes (vgl. DE 69001151 T2, DE 19938270 A1, DE 19757190 A1, DE 19721255 A1, oder DE 19613813 C2) oder andere nicht-berührungslose Verfahren (vgl. DE 19754093 C2, DE 19516809 C1, oder DE 10063557 A1). Darüber hinaus sind aus der DE 19916979 A1 Verfahren zur Füllstandsmessung mit einer Vielzahl nebeneinander entlang einer Füllstrecke angeordneter kapazitiver Sensoren bekannt. Die US 5722290 A beschreibt den Aufbau eines kapazitiven Füllstandsmessers mit Ringoszillator. Die DE 69530863 T2 beschreibt einen Füllstandssensor, basierend auf einer Laufzeitmessung, der sich auch als linearer Weg-Messwandler verwenden lassen kann. Auch in der EP 0760467 A1 wird eine Füllstandsmessung in einem Rohr mit Hilfe eines kapazitiven Verfahrens beschrieben.

Auch Verfahren und Vorrichtungen zur Bestimmung von Dichteprofilen in geschlossenen Fördervorrichtungen zählen zum Stand der Technik. Zu diesen Methoden gehört die Klasse der Elektrischen-Kapazitäts- Tomografie-Sensoren (ECT). Ein Beispiel ist in der EP 0326266 dargestellt, in der auch entsprechende Rekonstruktionsmethoden offenbart sind.

In der US 4,568,874 A wird eine Anordnung geoffenbart, bei der das Vorhandensein einer Flüssigkeit mit Hilfe von wenigstens drei Elektrodenringen ermittelt wird, wobei die Empfindlichkeit durch konduktive Ablagerungen im Rohr vermindert wird. Die Anordnung

wird nicht zur Geschwindigkeitsmessung sondern ausschließlich zur Dichtemessung verwendet. Bestimmung der dielektrischen Eigenschaft des Fördergutstromes an den Beobachtungsstellen. In der US 4568874 A wird die Methode des „active guarding“ verwendet, bei dem Hilfselektroden mit dem Potential der Empfangselektroden beaufschlagt werden, um Störeffekte zu vermeiden bzw. den Empfindlichkeitsbereich zu verschieben: eine schaltungs-technisch aufwendige Methode.

Eine Vorrichtung zur kapazitiven Messung unter Verminderung von Streufeldeffekten wird in der DE 4442711 A1 beschrieben. Auch hier werden gesteuerten Hilfselektroden (active guarding) verwendet, was wiederum einen entsprechenden schaltungstechnischen Aufwand mit sich bringt.

Zum Messen der Strömungsgeschwindigkeit eines Fördergutstromes sind viele Verfahren und entsprechende Vorrichtungen bekannt geworden. So beschreibt beispielsweise die DE 4025952 A1 die Messung der Strömungsgeschwindigkeit von feinkörnigen Schüttgütern in einer pneumatischen oder hydraulischen Suspension durch eine berührungslose Messung mit kapazitiven Sensoren. Dabei liegen an der Außenseite eines Messrohres zwei Geberelektroden einer Sensorelektrode räumlich gegenüber, wobei an die Geberelektroden eine Wechselspannung gegenphasig angelegt wird. Stromab oder stromauf davon sind nochmals zwei Geberelektroden und eine Sensorelektrode vorgesehen, wobei hier die Speisung mit einer anderen Frequenz erfolgt. Unter Verwendung phasenempfindlicher Gleichrichter und einer Signalverarbeitung durch Kreuzkorrelation werden statistische Fluktuationen erfasst und aus diesen wird auf die Fließgeschwindigkeit geschlossen. Eine ähnliche Messanordnung mit zwei Elektrodenpaaren geht aus der DE 3909177 A1 als bekannt hervor. Ebenso wie bei dem zuvor genannten Dokument erfolgt die Erfassung und Auswertung statistischer Fluktuationen des Massenstroms, hier Kohlenstaub, nach hoher Signalverstärkung mit Hilfe von phasenempfindlichen Gleichrichtern und eines Laufzeitkorrelators.

Eine in der WO 01/65212 A1 beschriebene Messanordnung verwendet zwei in Abstand voneinander gelegene, ringförmige, außen ein Durchflussrohr umgebende Kapazitäts-sensoren mit zumindest je drei Elektroden. Strömungsparameter werden durch Erfassung von Kapazitätsänderungen an den beiden Sensoren und Kreuzkorrelation gewonnen.

Auch das Problem der räumlichen Mittelung von Fluktuationen ist dem Stand der Technik bekannt. In der EP 0108876 A1 wird eine Vorrichtung beschrieben, bei der die räumlich Mittelung durch Aufteilung der Elektroden in pseudo-zufälliger Weise entlang des Rohres erfolgt, um einerseits genügend große Signale zu erhalten und andererseits den Mittelungseffekt zu reduzieren.

Bei bekannten Durchflussmessungen wird an zumindest zwei Stellen in Flussrichtung eine dielektrische Eigenschaft des Fördergutes bestimmt. Es ist erforderlich, dass diese dielektrische Eigenschaft an jeder Beobachtungsstelle zeitliche Fluktuationen aufweist. Diese Fluktuationen der dielektrischen Eigenschaft können natürlichen Ursprungs sein (z. B. Konzentrationsschwankungen bei turbulenter Strömung) oder beabsichtigt eingebracht werden (z. B. Einspritzen eines anderen Mediums in den Fördergutstrom).

Aufgrund der erforderlichen räumlichen Ausdehnung der Messeinrichtungen (Elektroden) erfolgt eine Mittelung von Fluktuationen und dadurch eine Abschwächung der Signalschärfe.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass durch die Ausbildung von Streufeldern eine weitreichende Empfindlichkeit gegeben ist, die über den gewünschten Beobachtungsbereich der Messanordnung hinausgeht. Um eine ausreichende Signalschärfe zu erhalten muss der Abstand zwischen den beiden Beobachtungsstellen groß gewählt werden. Andererseits bedeutet ein großer Abstand, insbesondere bei turbulenten Flussbedingungen, dass Fluktuationen während der Bewegung von einer Beobachtungsstelle stromauf zu einer Beobachtungsstelle stromab stark verändert werden (rheologischer Zerfall der Fluktuation), wodurch die Signalschärfe des Korrelationsergebnisses abnimmt.

Insbesondere die Verwendung einer Vielzahl von Elektroden, wie sie bei der Bestimmung eines Profils erforderlich ist, führt weiters zu einer hohen Schaltungskomplexität, da viele Messwerte ermittelt werden müssen.

Die komplexe Anordnung von Elektroden, Elektronik und Schirmung führt zu komplexen mechanischen Aufbauten, die sich im Allgemeinen schwer in bestehende Anlagen integrieren lassen.

Eine Aufgabe der Erfindung liegt daher in der Schaffung eines Verfahrens und einer Messanordnung, welche die weit reichende Empfindlichkeit einer kapazitiven Messanordnung zur Messung einer dielektrischen Eigenschaft verkleinert und dadurch eine Verkleinerung des Abstandes zwischen zwei Beobachtungsstellen ermöglicht.

Eine weitere Aufgabe der Erfindung liegt darin, durch eine erhöhte lokale Empfindlichkeit eine geringere Mittelung von Fluktuationen zu bewirken. Beide Merkmale führen zu einer Verbesserung der Bestimmung von Geschwindigkeit/Geschwindigkeitsprofil und Dichte/Dichteprofil eines Fördergutstromes.

Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht darin, die Komplexität der elektronischen Schaltung und somit die Kosten der Herstellung, insbesondere bei der Verwendung einer Vielzahl von Elektroden, gering zu halten.

Des Weiteren ist es ein Aspekt der Erfindung, dass eine platzsparende, kompakte, gegen äußere Einflüsse geschützte Vorrichtung, die einfach in bestehende Anlagen integriert werden kann, geschaffen wird.

Zur Lösung zumindest einer dieser Aufgaben sieht die Erfindung bei einer Vorrichtung der eingangs genannten Art vor, dass erfindungsgemäß einer ersten, stromauf gelegenen Sendeelektrodenanordnung sowie einer zweiten, stromab gelegenen Sendeelektrodenanordnung Wechspannungssignale zugeführt werden und durch Verschiebestrome an einer zwischen den Sendeelektroden gelegenen Empfangselektrodenanordnung entstehende Empfangssignale erfasst und einer zeitdiskreten Kreuzkorrelation unterworfen werden, wobei aus den Ergebnissen die Durchlaufzeiten der von den Elektroden erfassten Fluktuationen ermittelt werden.

Ebenso werden Aufgaben der Erfindung mit Hilfe einer Vorrichtung der eingangs angegebenen Art gelöst, welche erfindungsgemäß gekennzeichnet ist durch eine erste, stromauf gelegene Sendeelektrodenanordnung ( $S_1$ ) sowie eine zweite, stromab gelegene Sendeelektrodenanordnung ( $S_2$ ) sowie eine zwischen den Sendeelektroden gelegene Empfangselektrodenanordnung (E), wobei diese Elektrodenanordnungen am Umfang einer in einer Leitung geführten Strömung eines Fluidums vorgesehen sind, und eine Empfangs- und Auswerteinrichtung, zum Erfassen der durch Verschiebestrome hervorgerufenen Empfangssignale ( $s_e$ ), zum Durchführen einer zeitdiskreten Kreuzkorrelation sowie zum Ermitteln der Durchlaufzeiten der von den Elektroden erfassten Fluktuationen aus den Kreuzkorrelationswerten.

Die vorliegende Erfindung unterscheidet sich von vielen der bekannten Vorrichtungen dadurch, dass die Elektrodenmittel nicht orthogonal zur Flussrichtung angeordnet sind und dass eine gemeinsame Empfangselektrode für beide Messstellen verwendet werden kann. Die sich daraus ergebenden Vorteile werden in der detaillierten Beschreibung der Erfindung ausführlich behandelt.

Die vorliegende Erfindung bietet auch den Vorteil, dass die Messung der Kopplungskapazitäten in Flussrichtung erfolgt, wodurch die lokale Empfindlichkeit erhöht wird. Weiters kann dadurch die räumliche Ausdehnung (Platzbedarf) der Vorrichtung gegenüber bekannten kapazitiven Durchflusssensoren verkleinert werden.

Die Messungen können dabei unter dynamischen Bedingungen (fließendes Fördergut) oder unter statischen Bedingungen (ruhendes Fördergut) erfolgen, wobei für statische Bedingungen nur die die Dichte bzw. das Dichteprofil ermittelt werden kann

Die Beschaffenheit und die rheologischen Eigenschaften der beladenen Substanz stellen hierbei keine Einschränkung dar, da die Messung auf einem berührungslosen, kapazitiven Verfahren beruht.

Weitere zweckmäßige Merkmale sind in den abhängigen Unteransprüchen 2 bis 10 sowie 12 bis 17 gekennzeichnet.

Die Erfindung samt weiteren Vorteilen ist im Folgenden an Hand beispielsweise Ausführungsformen näher erläutert, die in der Zeichnung veranschaulicht sind. In dieser zeigen

Fig. 1 in schematischer Seitenansicht einen Rohrabschnitt mit einer Elektrodenanordnung im Sinne der Erfindung,

Fig. 2 in einer Ansicht wie Fig. 1 eine andere Ausführung einer erfindungsgemäßen Elektrodenanordnung,

Fig. 3a und 3b die Anordnung von Elektroden an einem Rohr in schematischen Schnitten,

Fig. 4 eine Darstellung ähnlich Fig. 2 mit eingezeichneten Kopplungskapazitäten zwischen den Elektroden,

Fig. 5a bis 5c ein mit Elektroden versehenes Rohr in schematischem Schnitt mit drei unterschiedlichen Füllständen,

Fig. 6 eine Ansicht eines Rohres ähnlich den Fig. 2 und 4,

Fig. 7 ein Diagramm mit zwei Ausgangssignalen der Auswerteeinrichtung,

Fig. 8a und 8b in Seitenansicht zwei weitere Ausführungsformen von Elektrodenanordnungen, mit welchen ein Geschwindigkeitsprofil ermittelt werden kann,

Fig. 9a bis 9c in einer Ansicht wie Fig. 5a bis 5c eine zirkuläre Strömung zu unterschiedlichen Zeitpunkten,

Fig. 10a und 10b beispielsweise Ausführungen von Elektroden auf einem flexiblen Isoliermaterial,

Fig. 11a und 11b die Anordnung einer Schirmung an einem Rohr mit Elektroden in Seitenansicht und im Schnitt,

Fig. 12 in schematischer Seitenansicht die Anordnung von verschiebbaren Sendelektroden an einem Rohr,

Fig. 13 in einem Diagramm die Abhängigkeit des Ausgangssignals der Auswerteschaltung von dem einstellbaren Elektrodenabstand,

Fig. 14 in einem vereinfachten Blockschaltbild die gesamte Messanordnung nach der Erfindung

Fig. 15 in einem schematischen Schnitt jenen Strömungsbereich, in dem sich Fluktuationen auf eine bestimmte Elektrode stark auswirken.

In der nun folgenden Beschreibung zeigt Fig. 1 ein Rohr aus isolierendem Material, auf welchem außen eine ringförmige Empfangselektrode E sowie zwei ringförmige Sendelektroden S<sub>1</sub> und S<sub>2</sub> angeordnet sind.

Gemäß Fig. 2 ist jede Sendelektrode in acht Einzelelektroden unterteilt, die nach Fig. 3a außen an einem Rohr sitzen, nach Fig. 3b jedoch in ein Rohr eingearbeitet sind.

Wie aus Fig. 4 ersichtlich, können Sendevorrichtung und Empfangsvorrichtung prinzipiell vertauscht werden, da die Kopplungskapazitäten identisch bleiben. Aufgrund der in der kapazitiven Messtechnik üblicherweise höheren Komplexität der Empfangsvorrichtung empfiehlt sich jedoch die Verwendung einer gemeinsamen Empfangsvorrichtung. Die weiteren Beschreibungen der Erfindung beziehen sich deshalb auf diese bevorzugte Ausführungsform mit mehreren Sendevorrichtungen und einer gemeinsamen Empfangsvorrichtung.

Durch die in der Erfindung beschriebene Anordnung der Elektroden und der entsprechenden Auswertung wird eine gute Entkopplung der Sendevorrichtungen erzielt, da die von einem Sender ausgehenden Feldlinien beim Empfänger enden, ohne zuerst in den Wirkungsbereich des zweiten Senders einzudringen. Dadurch können die beiden Sendevorrichtungen in sehr geringem Abstand in Flussrichtung voneinander, zumindest aber



getrennt durch die Empfangsvorrichtung, aufgebaut werden ohne nennenswertes Übersprechen (cross-talk) zu verursachen. Der geringe Abstand, der mit dem der Erfindung zugrunde liegenden Prinzip erzielt werden kann, ermöglicht eine nicht-invasive Messung der Fördergeschwindigkeit auch bei Strömungen, bei denen sich Fluktuationen beispielsweise durch Durchmischung (z. B. stark turbulente Strömungen) in kurzer Zeit (bzw. auf kurzer Förderlänge) stark verändern. Außerdem ist der Mittelungseffekt, der bei großen Abständen auftritt, stark vermindert. Dadurch bewirken räumlich kleine Störungen entsprechend vergrößerte Signalamplituden.

Die Ausführung ist dabei so gewählt, dass Elektroden und Auswerteelektronik zur kapazitiven Messung aller angegebenen Fördereigenschaften und Förderparameter verwendet werden können.

Das der Erfindung zugrunde liegende physikalische Prinzip ist die Veränderung von Koppelkapazitäten durch Dielektrika mit von 1 verschiedenen relativen Dielektrizitätszahlen.

Die einfachste Ausführungsform des Erfindungsgegenstandes ist in Fig. 1 abgebildet, wobei die Geschwindigkeit über korrelative Verfahren ermittelt wird. Bei der verfeinerten Geometrie nach Fig. 2 kann eine Dichtemessung und eine Messung des Ausbreitungsverhaltens des Fördergutes in Flussrichtung zusätzlich zur Geschwindigkeitsmessung implementiert werden.

Die Messung der Koppelkapazitäten zwischen den beschriebenen Elektroden erfolgt z. B. sequentiell über einen Kanal, wobei sehr rasch hintereinander alle Elektroden der Sendevorrichtungen aktiviert werden. Eine Möglichkeit der Messung und Auswertung wird nun an Hand der Fig. 14 erläutert. Diese zeigt ein Blockschaltbild der Messschaltung in der Zeitmultiplex Variante. Über eine Schaltvorrichtung 2 wird ein hochfrequentes Signal aus einer Quelle 1, im einfachsten Fall Rechtecksignale, über eine Ansteuerschaltung AST, im einfachsten Fall Schaltung durch UND Gatter, zu den Sendeelektroden S1, S2 geleitet. Durch kapazitive Kopplung fließt ein Verschiebestrom  $i$ , der mit einem Messumsetzer 6 und nachfolgender analog-digital Umsetzung ADU einer Auswerteschaltung 8 zugeführt wird. Der Messumsetzer besitzt eine sehr niedrige Eingangsimpedanz ( $R_i < 1/100 \cdot 1/(2\pi \cdot f \cdot C)$ ), wobei  $f$  die Frequenz des hochfrequenten Signals ist und  $C$  die Kopplungskapazität zwischen Sende- und Empfangselektrode beschreibt. Dadurch befindet sich das Potential der Empfangselektrode E nahezu auf Masse (virtual ground) und eine Schirmung kann passiv durch Masseflächen erfolgen.

Die Steuer- und Auswertelogik 8 sorgt zunächst dafür, dass zyklisch nacheinander die stromauf und stromab gelegenen Elektroden S1, S2 angesteuert und der entsprechende Verschiebestrom  $i$  gemessen wird. Der Verschiebestrom  $i$  ist dabei der jeweiligen Kopplungskapazität 9 oder 10 direkt proportional. Eine bestimmte Anzahl  $N$  von zeitlich aufeinander folgenden Messwerten wird in einem Speicher der Steuer- und Auswertelogik 8 abgelegt. Dabei werden Messdaten der Kopplungskapazität 10 in einem Feld  $X$  gespeichert, Daten der Kopplungskapazität 9 in einem Feld  $Y$ . Die zeitdiskrete Kreuzkorrelation (Kurzzeit-Kreuzkorrelation) ist wie folgt definiert:

$$\Phi_{XY}[k] = \sum_{i=1}^N X[i] \cdot Y[i-k]$$

wobei die Messwerte vor der Korrelation vom arithmetischen Mittelwert befreit werden. Die Korrelationsfunktion  $\Phi_{XY}$  ist dann ein Maß für die Signalähnlichkeit. Eine Fluktuation im vorbeiströmenden Medium wird zuerst in der zur stromauf gehörigen Kopplungskapazität 9 wirksam und nach der geschwindigkeitsabhängigen Durchlaufzeit  $T$  in der zur stromab gehörigen Kopplungskapazität 10. Jene Verschiebung  $k$ , die zu einem Maximum in der Korrelationsfunktion  $\Phi_{XY}$  führt, ist damit der Durchlaufzeit  $T$  proportional.

$$T = \Delta t \cdot \arg \max_k \Phi_{XY}[k]$$

$\Delta t$  entspricht dabei der Abtastzeit (d. h. jenem Zeitintervall zwischen zwei Messungen derselben Sendeelektrode).

Die Geschwindigkeit ergibt sich mit  $l_{\text{eff}}$  als dem effektiven Abstand zwischen den Wirkbereichen aus

$$v = \frac{l_{\text{eff}}}{T}$$

Bei einer Segmentierung der Sendeelektroden gemäß Fig. 2 werden die Kreuzkorrelationen jeweils zwischen allen, zu den jeweiligen Segmenten der ersten Messebene gehörigen Messdaten, und allen, zu den jeweiligen Segmenten der zweiten Messebene gehörigen Messdaten, gebildet. Dadurch ist die Empfindlichkeit nicht mehr über das gesamte Rohr gleich, sondern an bestimmten Stellen erhöht und an anderen verringert – eine räumliche Auflösung ist somit möglich.

Der in der Erfindung verwendete Begriff „Rohr“ beschränkt sich nicht auf Körper mit rundem oder rechteckigem Umfang und kann zum Transport von Flüssigkeiten, Pulvern, Gasen und Festkörpern verwendet werden.

Jener Abschnitt des Rohres, an dem die Messung der Fördereigenschaften durchgeführt wird, kann sich vom Rest des Rohrsystems in Material, Struktur und Eigenschaften wie der Leitfähigkeit und Elastizität unterscheiden. Unabhängig vom Aufbau des restlichen Rohrsystems muss das Rohrstück des Messabschnitts aus zumindest teilweise nicht-leitendem Material bestehen.

Kapazitive Füllstandsmessungen von Gefäßen werden in erster Linie für senkrecht stehende Behältnisse angewendet und gehören zum Stand der Technik. Hier soll das Prinzip der kapazitiven Füllstandsmessung auf horizontal liegende oder geneigte Rohre gegeben werden, da die Elektrodenanordnung nach der Erfindung auch dazu geeignet ist. Zwei beispielhafte Ausführungsformen jenes Rohrabschnittes, der zur Füllstandsmessung verwendet wird, sind in Fig. 3a und Fig. 3b gegeben. Bei Fig. 3a handelt es sich um eine Ausführungsform, die aus einem nichtleitenden Rohr besteht, auf dessen Oberflächen Elektroden aufgebracht werden. Fig. 3b zeigt eine Ausführungsform bei der beschriebener Rohrabschnitt aus durchgehenden Metallstreifen (Elektroden) besteht, die durch nichtleitendes Material wie z. B. Kunststoff unterbrochen sind. In seiner Gesamtheit bietet auch ein Aufbau nach Fig. 3b ein funktionsfähiges Rohr im Sinne eines Transportes oder einer Lagerung von Flüssigkeiten, Pulvern, Gasen und Festkörpern. Die Ausführungsformen aus Fig. 3a und 3b können so verwendet werden, dass für Messungen die Kapazitäten zwischen entsprechenden Elektroden und der Empfangselektrode (siehe Fig. 4) betrachtet werden können. Die Substanz im Rohr, deren Füllstand bestimmt werden soll, besitzt eine gewisse relative Dielektrizitätszahl, die von der Dielektrizitätszahl eines anderen Mediums im Rohr (z. B. Luft) verschieden ist. Physikalisch bedeutet eine Änderung der Dielektrizitätszahl eine Änderung der Kapazität zwischen Sende- und Empfangsvorrichtung. Für Flüssigkeiten, Pulver und Festkörper kann eine Verteilung ähnlich der in Fig. 5a bis 5c gezeigten angenommen werden. Das Vorhandensein der Substanz im Rohr, verbunden mit ihrer ihr eigenen relativen Dielektrizität, verändert den Wert der Kapazität zwischen den Sende- und Empfangsvorrichtungen.

In Fig. 5a bedeutet eine Befüllung (relative Dielektrizitätszahl des Materials größer als die des umgebenden Mediums) eine Kapazitätzunahme von  $C_{1\_Empf}$  und  $C_{8\_Empf}$  und eine minimale Beeinflussung der Kapazitäten  $C_{2\_Empf}$  und  $C_{7\_Empf}$ , während  $C_{3\_Empf}$ ,  $C_{4\_Empf}$ ,  $C_{5\_Empf}$  und  $C_{6\_Empf}$  nahezu unverändert bleiben.

In Fig. 5b ist hier auch schon  $C_{2\_Empf}$  und  $C_{7\_Empf}$  stark erhöht und in Fig. 5c sind alle Kapazitäten bis auf  $C_{4\_Empf}$  und  $C_{5\_Empf}$  durch das Material im Rohrinneeren deutlich erhöht.

Für den Aufbau des Rohrabschnittes ist eine Anordnung gemäß Fig. 3b jener von Fig. 3a zu bevorzugen, da der Einfluss des Rohres selbst nur in kleinerem Maß in die Messung eingeht und von präziseren Messungen auszugehen ist.

Es ist für die Messung des Füllstandes zu empfehlen acht oder mehr Elektroden pro Sendevorrichtung zu verwenden. Durch die Überbestimmtheit des Systems (acht oder mehr Kapazitätswerte für einen Parameter) ist eine Relativmessung des Füllstandes möglich. Die Messung basiert auf der Erfassung der Verhältnisse der Änderungen der Kapazitätswerte zueinander. Somit ist die Messung unabhängig von globalen Störgrößen wie Temperatur, Feuchtigkeit, usw., die eine Einzelmessung stark beeinflussen würden. Nur noch sehr lokale Inhomogenitäten haben Einfluss auf das Messergebnis.

Für die Bestimmung der Fördergeschwindigkeit werden den Kopplungskapazitäten proportionale Signale einander entsprechender Elektroden korreliert. Fig. 6 zeigt das verwendete Prinzip. Eine natürliche oder willentlich eingebrachte Störung (=Fluktuation in der Verteilung der relativen Dielektrizität) des Fördergutes verursacht im Wirkungsbereich 1 der Konfiguration (z. B. auf Höhe der Elektrode  $E_{x,1}$ ) wegen der sich ändernden Koppelkapazität  $C_{Ex,1\_Empf}$  ein verändertes Signal. Unmittelbar darauf ist dieselbe Störung im Wirkungsbereich 2 (auf Höhe  $E_{x,2}$ ) und verursacht eine vergleichbare Signaländerung (vgl. Fig. 7). Die Formänderung der Störung mit der zurückgelegten Wegstrecke verdeutlicht die Zweckmäßigkeit von knapp aneinander befindlichen Sendevorrichtungen.

An der Empfangsvorrichtung ist nach der Auswerteschaltung ein der Koppelkapazität proportionales Signal  $U_{Ex,1}$  abzugreifen, wenn (nur) die Elektrode  $E_{x,1}$  sendet. Aus dem bekannten Abstand der Wirkungsbereiche und der Zeitdifferenz, die z. B. aus der Kreuzkorrelation entsprechender Signale  $U_{Ex,1}$  und  $U_{Ex,2}$  gewonnen wird, kann nach bekannter Methode eine mittlere Fördergeschwindigkeit berechnet werden. Bei Verwendung mehrerer Sendevorrichtungen (vgl. Fig. 8a) kann ein „Tiefen-Geschwindigkeitsprofil“ ermittelt werden, indem man Signale, die in unterschiedlichem Abstand zur Empfangsvorrichtung in Flussrichtung angeordneten Sendevorrichtungen, korreliert. Das elektrische Feld von Sendevorrichtungen, die von der Empfangsvorrichtung weiter entfernt sind, bildet sich tiefer ins Fördergut hinein aus – die Anordnung wird somit sensitiv auf Störungen in Schichten des Fördergutes, die weiter vom Rand des Förderrohres entfernt liegen (vgl. Fig. 8b).

Die Messung des Ausbreitungsverhaltens des Fördergutes in Flussrichtung erfolgt nach dem selben Prinzip wie die Messung des Füllstandes bzw. Dichteprofiles. Mittels Korrelation kann eine maximale Ähnlichkeit in den Signalverläufen in den Dichteprofilen beider Wirkungsbereiche gesucht werden. Wird eine Veränderung bezüglich der Position der Fluktuation relativ zu den Elektroden von einer Beobachtungsstelle zur nächsten (rotatorischer Versatz) beobachtet, kann von einem sich in Flussrichtung drehendem Fördergut ausgegangen werden (z. B. CFB, circulating fluidized bed) – je nach Richtung und Ausmaß des Versatzes von einem Wirkungsbereich zum nächsten kann zwischen rechts- und linksdrehendem Fördergut und den unterschiedlichen Stärken der Drehung unterschieden werden. Fig. 9a bis 9c zeigen ein Beispiel eines sich drehenden Fördergutes.

Die Fig.en 10a und 10b zeigen beispielhafte Elektroden-Geometrien des Erfindungsgegenstandes, die hier als sogenannter „Flexprint“ ausgeführt sind und auf ein bestehendes Rohr einer Anlage durch Umwicklung montiert werden kann. Gemäß Fig. 10a sind vier, zu der Empfangselektrode in Flussrichtung jeweils symmetrischen Sendeelektrodenanordnungen S1, S1', S2, S2' mit je acht Elektroden vorgesehen, Fig. 10b zeigt die Elektrodenkonfiguration für zwei Sendevorrichtungen mit jeweils 16 Elektroden. Diese Ausführung als Flexprint stellt eine kostengünstige und robuste Ausführungsform der Geometrie nach Fig. 3a dar. Die Leitungen (Verbindungen) zu den Elektrodenflächen können zu einer Lötfläche für ein (Flachband)Kabel am Flexprint herausgeführt werden (in den Figuren nicht eingezeichnet). Über der Elektrodenanordnung, insbesondere der Empfangselektrode kann aus Gründen der Unempfindlichkeit gegen äußere Störungen und Übersprechen von den Leitungen auf die Empfangselektrode eine Isolierung aufgebracht (z. B. umwickelt) sein, auf der eine elektrische Schirmung (vgl. Fig. 11a und b) aufgebracht ist, z. B. eine auf gemeinsame Masse gelegte Metallfolie). Eine derartige Schirmung dient auch zur Minimierung der Abstrahlung elektromagnetischer Wellen von den Sendevorrichtungen nach außen.

In Xie C G, Huang S M, Hoyle B S, Thorn R, Lenn C, Snowden D und Beck M S 1992 *Electrical capacitance tomography for flow imaging - systemmodel for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors* IEE Proc. G 139 89–98 wird die Methode der Rückprojektion beschrieben, mit der aus Messdaten und bekannten Empfindlichkeiten Dichteprofile ermittelt werden können. Trotz geänderter Elektrodentopologie ist diese Methode sowohl auf das Geschwindigkeits- als auch auf das Dichteprofil anwendbar.

Für sehr turbulente Strömungen und für sehr langsam beförderte Strömungen können sich natürliche oder künstlich eingebrachte Störungen von einer Messebene zur nächsten stark verändern, was zu einer verschlechterten Korrelation der abgeleiteten Signale beider Ebenen führt. Je weiter beide Messebenen beisammen sind desto geringer der Unterschied in der

Materialverteilung in beiden Ebenen und desto höher die Ähnlichkeit der Signale (gute Korrelation). Wegen der damit verminderten Auflösung der Ermittlung der Zeitdifferenz (und damit der verminderten Auflösung der Geschwindigkeitsbestimmung) wird man aber bemüht sein, diesen Abstand soweit zu vergrößern, soweit es die Qualität der Korrelationsfunktion zulässt.

Um den Abstand zwischen den beiden Messebenen auf die vorherrschende Strömung anzupassen, sieht die in den Fig. 12 und 13 erläuterte Variante der Erfindung die Anpassung des Abstandes der Elektroden, abhängig von der Amplitude der Korrelationsfunktion, vor. Die Sendelektroden sind dabei auf am Rohr verschiebbaren Trägerringen aufgebracht, die beispielsweise mittels eines Spindelantriebes manuell oder automatisch, von den Messergebnissen gesteuert, in ihrer Position verschoben werden können.

Unter der Annahme, dass sich die allgemeinen Förderbedingungen (z. B. Parameter der Förderluftzufuhr) nur geringfügig während eines stationären Förderprozesses ändern, wird der Abstand zwischen den beiden Ebenen von einer minimalen bis zu einer maximalen Position verändert und für jede Position die Korrelationsfunktionen entsprechender Elektroden gebildet. Jener Abstand zwischen den Messebenen, bei der die Korrelationsfunktionen (im Mittel) noch klar detektierbare Spitzen liefert, wird für die Messung der Fördereigenschaften verwendet. Die Abhängigkeit der ermittelten Amplitude von dem Abstand einer Sendelektrode zu der Empfangselektrode ist in Fig. 13 beispielsweise gezeigt.

## ANSPRÜCHE

1. Verfahren zum Bestimmen von Parametern einer Fluktuationen aufweisenden Strömung eines Fluidums in einer Leitung, wobei am Umfang der Strömung zumindest drei, in Strömungsrichtung voneinander in Abstand befindliche Elektroden (S1, E, S2) vorgesehen sind,

dadurch gekennzeichnet, dass

einer ersten, stromauf gelegenen Sendelektrodenanordnung (S1) sowie einer zweiten, stromab gelegenen Sendelektrodenanordnung (S2) Wechselspannungssignale ( $s_s$ ) zugeführt werden und durch Verschiebestrome an einer zwischen den Sendelektroden gelegenen Empfangselektrodenanordnung (E) entstehende Empfangssignale ( $s_e$ ) erfasst und einer zeitdiskreten Kreuzkorrelation unterworfen werden, wobei aus den Ergebnissen die Durchlaufzeiten der von den Elektroden erfassten Fluktuationen ermittelt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Wechselspannungssignale ( $s_s$ ) den Sendelektrodenanordnungen (S1, S2) zeitlich gesteuert zugeführt werden und die Kreuzkorrelation unter Einbeziehung des Verlaufes der zeitlichen Steuerung der Sendesignale ausgeführt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass ein Wechselspannungssignal ( $s_s$ ) abwechselnd an die Sendelektroden geschaltet wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die zumindest eine erste und/oder zumindest eine zweite Sendelektrodenanordnung mehrere, über den Umfang der Strömung verteilte Einzelelektroden ( $S_{11}...S_{18}/S_{21}...S_{28}$ ) aufweisen.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass zwei erste und zwei zweite Sendelektrodenanordnungen verwendet werden (Fig. 8a).

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass aus den Durchlaufzeiten der Fluktuationen zwischen den Elektroden mit Hilfe einer Rückprojektion ein Geschwindigkeitsprofil ermittelt wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektrodenanordnungen auf einem flexiblen, isolierenden Trägermaterial vorgesehen sind und dieses Material an der inneren/äußeren Oberfläche eines Förderrohres für das Fluidum angeordnet wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass eine gemeinsame äußere Schirmung (SCH) für die Elektrodenanordnungen vorgesehen ist.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Zuführung der Wechselspannungssignale ( $s_s$ ) sowie die Messung der Empfangssignale ( $s_e$ ) asymmetrisch gegen eine gemeinsame Masse erfolgt.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine der Sendelektrodenanordnungen bezüglich der Empfangselektrodenanordnung stromauf/stromab verschiebbar ist, sodass der entsprechende Abstand, abhängig von der Amplitude des erhaltenen Kreuzkorrelationswertes, zu dessen Optimierung an die Strömungsverhältnisse angepasst werden kann.
11. Vorrichtung zum Bestimmen von Parametern einer Fluktuationen aufweisenden Strömung eines Fluidums in einer Leitung, wobei am Umfang der Strömung zumindest drei, in Strömungsrichtung voneinander in Abstand befindliche Elektroden (S1, E, S2) vorgesehen sind,

gekennzeichnet durch

eine erste, stromauf gelegene Sendelektrodenanordnung (S1) sowie eine zweite, stromab gelegene Sendelektrodenanordnung (S2) sowie eine zwischen den Sendelektroden gelegene Empfangselektrodenanordnung (E), wobei diese Elektrodenanordnungen am Umfang einer in einer Leitung geführten Strömung eines Fluidums vorgesehen sind,

und eine Empfangs- und Auswerteeinrichtung, zum Erfassen der durch Verschiebestrome hervorgerufenen Empfangssignale ( $s_e$ ), zum Durchführen einer zeitdiskreten Kreuzkorrelation sowie zum Ermitteln der Durchlaufzeiten der von den Elektroden erfassten Fluktuationen aus den Kreuzkorrelationswerten.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass eine Ansteuerschaltung (AST) zur zeitlich gesteuerten Zuführung der Wechselspannungssignale ( $s_s$ ) an die Sendelektrodenanordnungen (S1, S2) vorgesehen ist.



13. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass die zumindest eine erste und/oder zumindest eine zweite Sendelektrodenanordnung mehrere, über den Umfang der Strömung verteilte Einzelelektroden ( $S_{11}...S_{18}/S_{21}...S_{28}$ ) aufweisen.
14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 11 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass zwei erste und zwei zweite Sendelektrodenanordnungen vorgesehen sind (Fig. 8a).
15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 11 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Elektrodenanordnungen auf einem flexiblen, isolierenden Trägermaterial vorgesehen sind und dieses Material an der inneren/äußeren Oberfläche eines Förderrohres für das Fluidum angeordnet ist.
16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 11 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass eine gemeinsame äußere Schirmung (SCH) für die Elektrodenanordnungen vorgesehen ist.
17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 11 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine der Sendelektrodenanordnungen bezüglich der Empfangselektrodenanordnung stromauf/stromab verschiebbar gelagert ist.

1/4

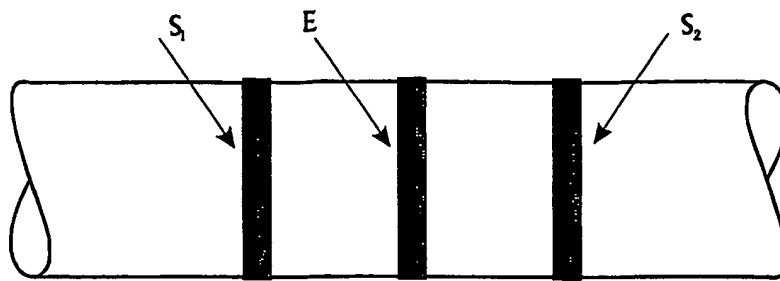


Fig. 1

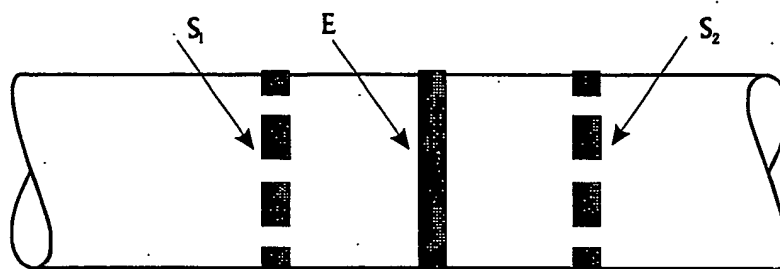


Fig. 2

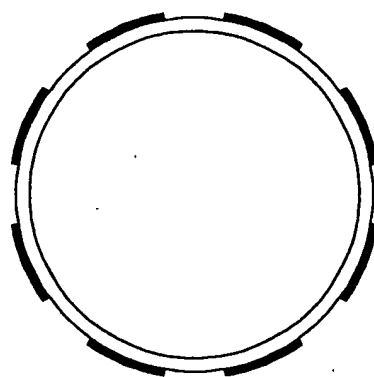


Fig. 3a

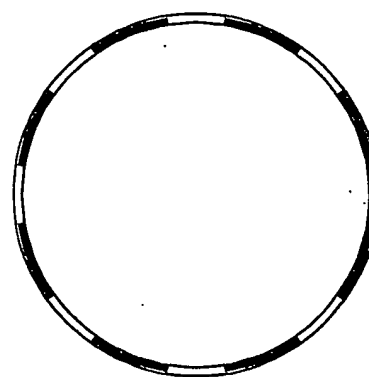


Fig. 3b

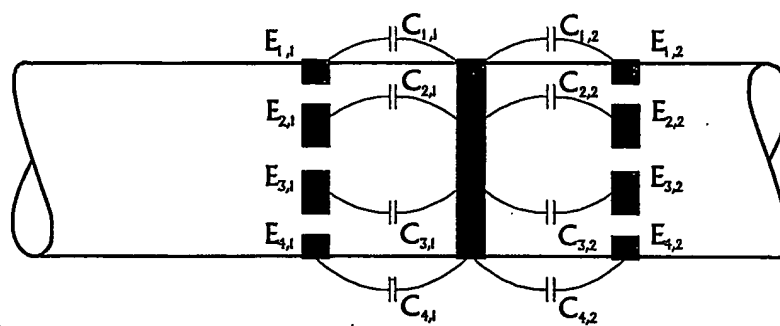


Fig. 4

2/4

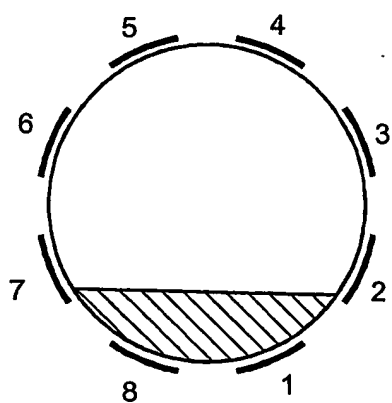


Fig. 5a

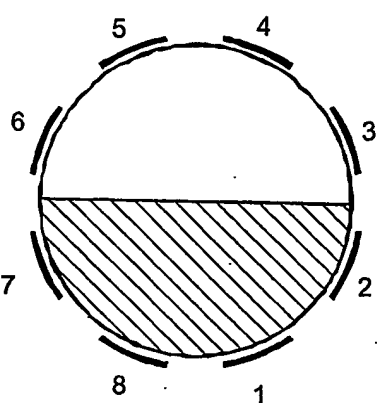


Fig. 5b

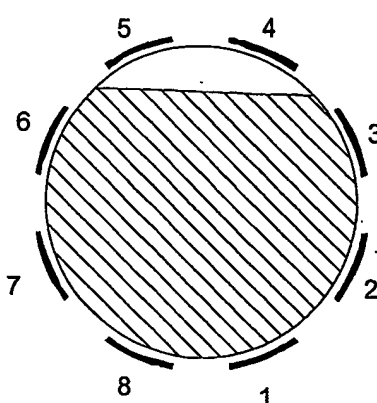


Fig. 5c

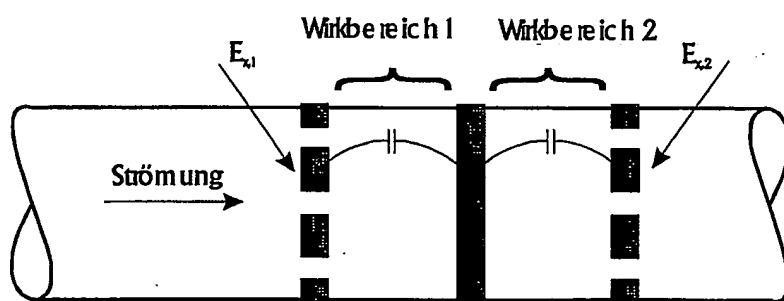


Fig. 6

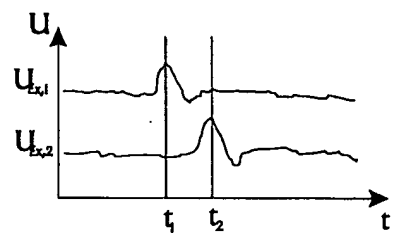


Fig. 7

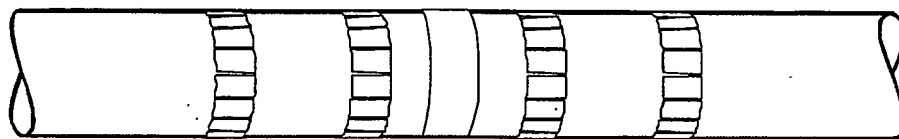


Fig. 8a

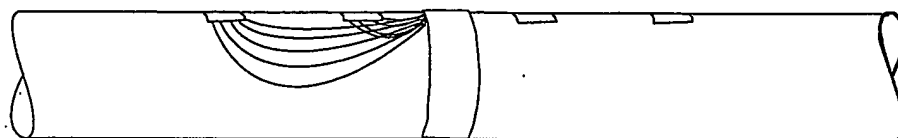


Fig. 8b

3/4

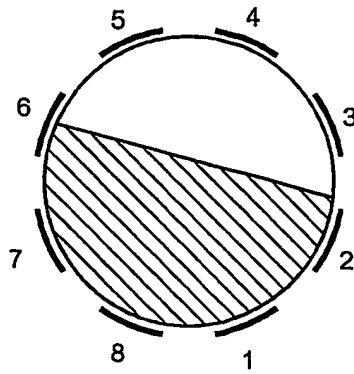


Fig. 9a

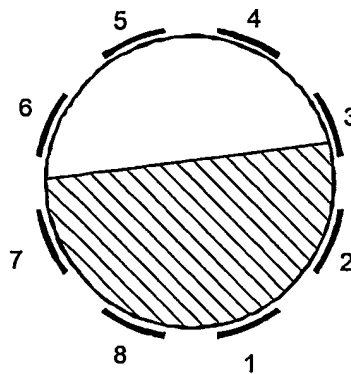


Fig. 9b

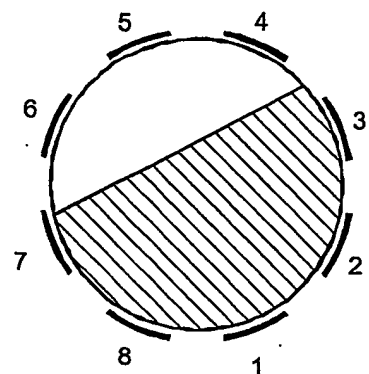


Fig. 9c

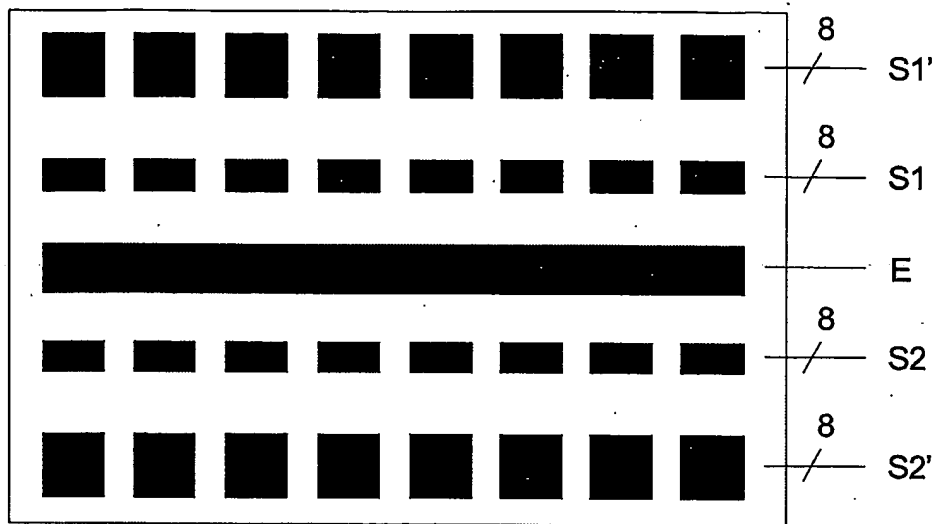


Fig. 10a

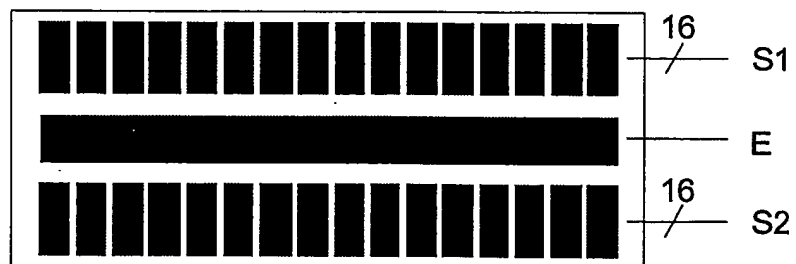


Fig. 10b

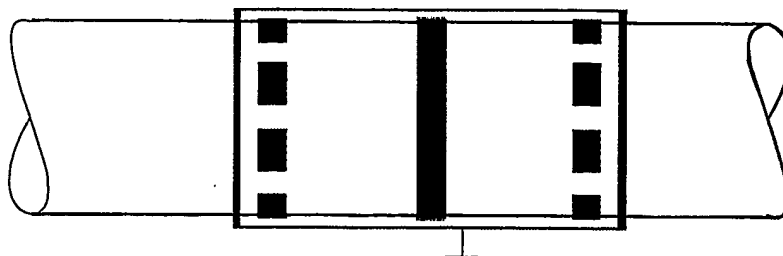


Fig. 11a

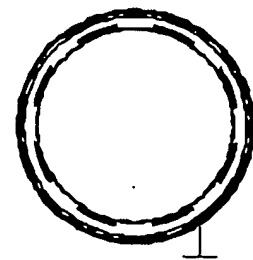


Fig. 11b

4/4

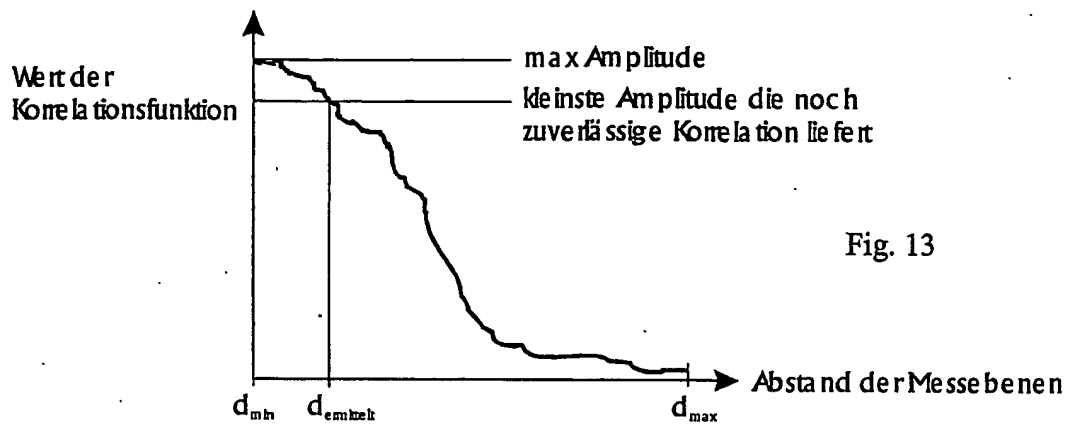


Fig. 13

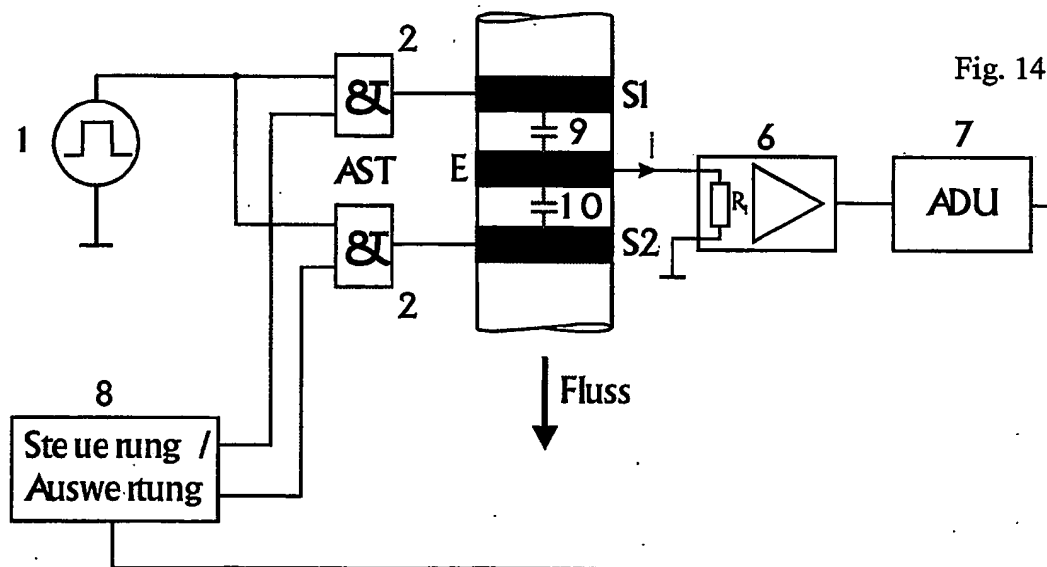


Fig. 14

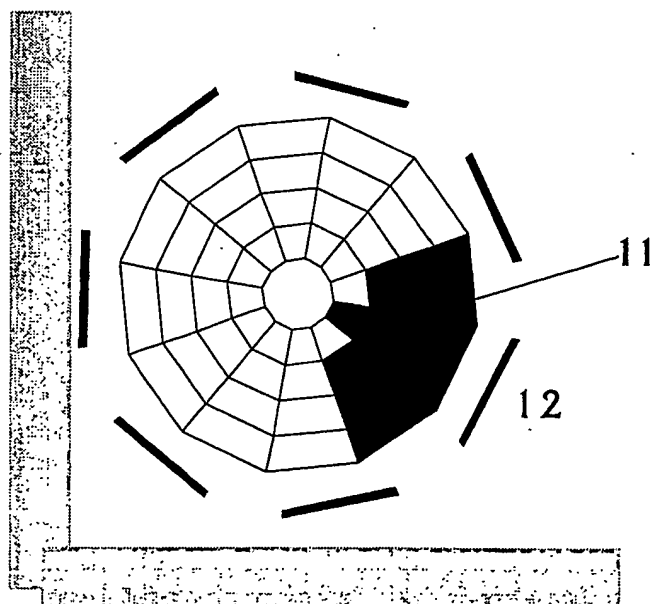


Fig. 15